

## ЗАЖИГАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

Егоров А.Г., Кальней Е.Д., Русаков М.М., Шайкин А.П.

*Тольяттинский политехнический институт*

В настоящее время порошкообразные металлы рассматриваются как самостоятельные источники энергии для создания нового класса энергетических установок (ЭУ). В связи с этим применение таких металлов как Al, Mg, Be и др. в качестве порошкообразного металлического горючего (ПМГ) для перспективных ЭУ, связано с исследованием целого ряда процессов, одним из которых является процесс воспламенения потока двухкомпонентной газозвеси. Специфика горения газозвесей определяется, с одной стороны, закономерностями горения отдельных частиц, а с другой, взаимным их влиянием друг на друга. Это обстоятельство определило два различных направления в изучении горения газозвесей: исследование микропроцессов (горение индивидуальных частиц) и макропроцессов (тепло- и массоперенос и распространение пламени в ансамбле частиц) [1]. Поэтому для получения физических представлений организации процесса зажигания ПМГ распыленного в высокоскоростном турбулентном потоке газообразного окислителя необходимо рассматривать с единых методических позиций как результаты многочисленных ранее опубликованных исследований по самовоспламенению индивидуальных частиц металлов, так и полученные в последнее время экспериментальные данные по вынужденному зажиганию потоков двухкомпонентных газозвесей.

Настоящая работа посвящена анализу результатов исследований по самовоспламенению газозвесей Al в замкнутом пространстве (каналах), а также зажиганию турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси (АВС) с точки зрения организации процесса воспламенения ПМГ в реальных условиях камеры сгорания ЭУ.

Вопрос о влиянии концентрации Al на основные параметры воспламенения - критическую температуру и период индукции решается однозначно. Практически во всех случаях увеличение концентрации частиц

снижает  $T_{кр}$  среды, при которой происходит воспламенение частиц и уменьшается  $\tau_{сн}$ . Частицы становятся легко воспламеняемыми даже при сравнительно невысокой температуре среды (или пламени), в которой одиночные частицы вообще не воспламеняются.

Воспламенение пылевого облака, содержащего широкий спектр размеров частиц, определяется в основном наименьшими из присутствующих частиц. На рис. 1 приведены данные по температуре воспламенения алюминиевой пыли в потоке кислорода в зависимости от среднего размера частиц полученные в работе [2].

В работе [3] изучались режимы самовоспламенения и горения газовзвеси частиц Al в воздухе при атмосферном давлении. В режиме самовоспламенения (на его пределе) изучалась зависимость температуры газа от концентрации частиц в газовзвеси. Зависимость, построенная на основании обработки данных более 400, опытов представлена на рис. 2. Ав-

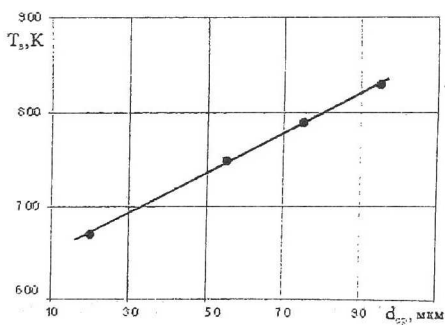


Рис. 1 Зависимость температуры воспламенения алюминиевой пыли в потоке кислорода от среднего размера частиц

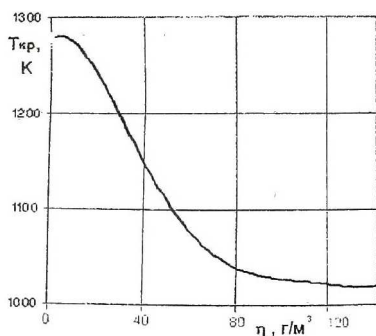


Рис. 2 Зависимость критической температуры воспламенения газовзвеси частиц алюминия от концентрации горючего

торы обращают внимание на то, что кривая зависимости имеет точку перегиба ( $\eta = 50 \text{ г/м}^3$ ) и что область возможных значений предельных температур оказывается неширокой. Значение температуры, ограничивающее указанную область снизу, сравнительно высоко и практически не меняется в диапазоне значений концентраций 80...400  $\text{г/м}^3$ . При увеличении концентрации частиц Al в аэрозвеси с 20 до 80  $\text{г/м}^3$  предельная температура самовоспламенения снижается с 1220 до 1040 К.

Уменьшение величины периода индукции частиц Al при повышении их концентрации в газовом потоке находит разумное объяснение в рамках тепловой теории. Воспламенение частиц определяется условиями их прогрева в окружающей газо-фазной атмосфере до температуры воспламенения. Эти условия в большей степени зависят от температуры среды. Для совокупности частиц теплоотвод от их поверхности, особенно если на ней имеет место дополнительный саморазогрев из-за реакции окисления, вызывает общее повышение температуры среды.

В работе [4], проведен анализ влияния микрокапсулирования частиц Al фторсодержащими органическими соединениями. Улучшение воспламеняемости аэрозвеси Al, покрытого, в частности полиметилфторакрилатом (ПМФА), объясняется, снижением периода индукции и ростом его реакционной способности, что и обуславливает в итоге ускорение распространения фронта пламени.

Воспламенение и горение частиц Al в потоке газообразного окислителя, по сравнению с облаком аэрозвеси, отличается рядом особенностей, обусловленных протеканием химических реакций в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также зависимостью параметров процесса как от кинетических характеристик ПМГ, так и от гидродинамических характеристик газодисперсного потока. Изменение характеристик потока газозвеси (концентрации, дисперсности, скорости, турбулентности и др.), а также условий зажигания будут существенно влиять на развитие процесса горения. Аэродинамика двухфазных турбулентных струй имеет ряд особенностей, обусловленных воздействием конденсированной примеси на усредненное и пульсационное движение. Характеристики двухфазных струй зависят от концентрации частиц, их массы, аэродинамических свойств, а также других факторов, учитывающих условия истечения газозвеси. Существенное влияние на структуру двухфазных турбулентных струй оказывают начальные условия, и в частности условия движения газозвеси в соплах и подводящих трубопроводах.

Известно [5], что если источником зажигания служит электрический разряд, то энергия необходимая для воспламенения аэрозвеси Al является функцией размера частиц: для меньших частиц требуются меньшие энергии, причем ее значение остается постоянным в широком диапазоне концентраций. При очень низких концентрациях воспламенение стано-



вится неустойчивым, так как оно происходит лишь в том случае, если частица попадет в разряд. Энергия воспламенения изменяется при изменении сопротивления, которое определяет продолжительность разряда. Вообще, существует оптимальное время разряда для воспламенения. На рис.3 представлено изменение мощности электрической искры, необходимой для зажигания аэрозвеси Al в средах с различным содержанием кислорода [6].

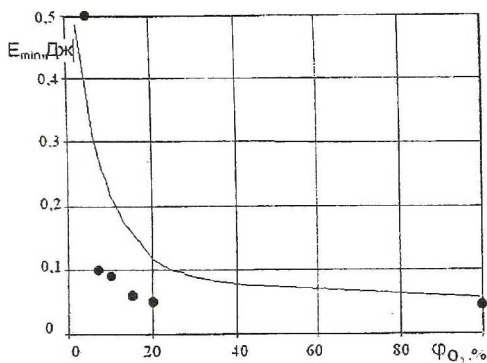


Рис. 3 Влияние концентрации кислорода на минимальную энергию зажигания аэрозвеси алюминия

значения критической скорости АВС ( $U_0 = 40 \text{ м/с}$ ) и минимального расхода ПМГ ( $G_{Al} = 3 \text{ г/с}$ ), ниже которых воспламенение не происходило. На рис. 4 показано влияние диаметра частиц Al на динамику развития процесса зажигания в канале диаметром 0,042 м при атмосферном давлении и начальных параметрах потока АВС:  $U_0 = 50 \text{ м/с}$ ;  $\alpha = 0,11$ ;  $T_0 = 293 \text{ К}$ . В качестве ПМГ использовались порошки АСД-1 и АСД-4, со средним диаметром ( $d_{cp}$ ) соответственно 12 и 5 мкм.

В варианте с АСД-1 (на рис. справа), наблюдается неравномерное распределение частиц в донной области ЗР, где в первую очередь распространяется пламя, инициированное электрическим разрядом. Время распространения пламени по ЗР с момента воспламенения составляет 25 мск. На рисунке видно, как пламя первоначально возникает в очагах и от них распространяется по ЗР. По причине полидисперсности порошков, вначале происходит выгорание мелких фракций частиц Al. После того, как пламя заполнило весь объем ЗР, формируется фронт пламени, кото-

В работе [7] исследовался процесс воспламенения дисперсного Al в высокоскоростном турбулентном потоке алюминиево-воздушной смеси (АВС) в осесимметричных каналах с внезапным расширением. С помощью электрической искры надежно воспламенялись до самоподдерживающегося горения порошки: ПАМ-4, АМД-50, АСД-1, АСД-4, ПА-4, ПА-2, АПС-1П. Были определены

рый имеет форму одного или нескольких языков вырывающихся из ЗР. Затем реагирующие объемы из ЗР переносятся в поток свежей АВС, и создают в ней очаги горения с последующим распространением пламени по всему потоку.

Процесс распространения пламени в ЗР для порошка АСД-4 (на рис. 4 слева) с более мелкими частицами, горение которых происходит в кинетическом режиме, развивается более динамично. Воспламенившись, от свечи зажигания, очаг горения развивается и заполняет ЗР за 3,3 мск (1 кадр). Затем фронт пламени формируется вдоль "определяющей" цилиндрической поверхности, диаметр которой равен диаметру входного отверстия канала и поджигает

основной поток АВС (2 и 3 кадр). На 4-м кадре четко просматривается начальный участок струи ПМГ и фронт пламени.

Влияние начальной турбулентности потока АВС на характер развития процесса зажигания в канале диаметром 0,042 м показан на рис. 5.

При трубной турбулентности распространение пламени от свечи зажигания по всей ЗР происходит за 2 кадра, что составляет 3,3 мск. При повышенной турбулентности это время увеличивается до 4,9 мск. Время

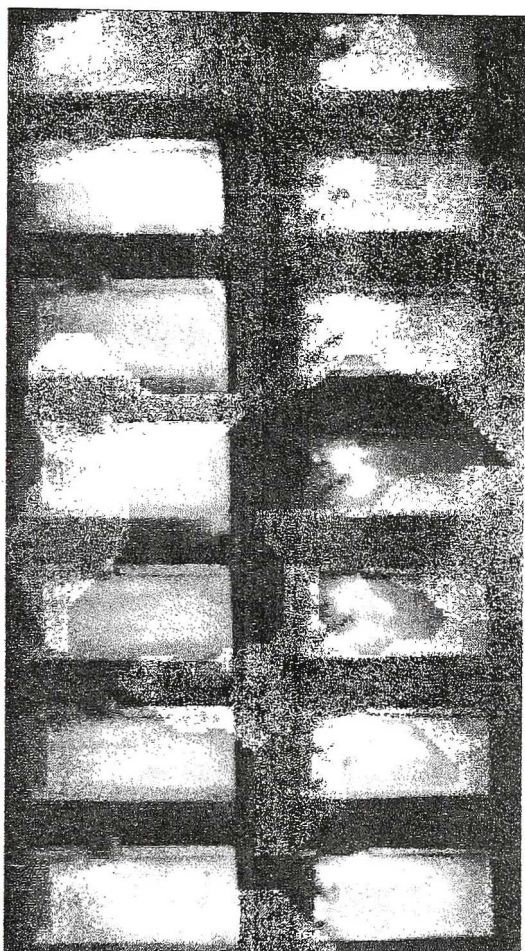


Рис. 4 Влияние диаметра частиц алюминия на процесс зажигания.

Слева – АСД-4; справа – АСД-1



распространения пламени из ЗР в основной поток АВС в обоих случаях осуществляется за время экспонирования одного кадра, т. е. менее чем за 1,6 мск.

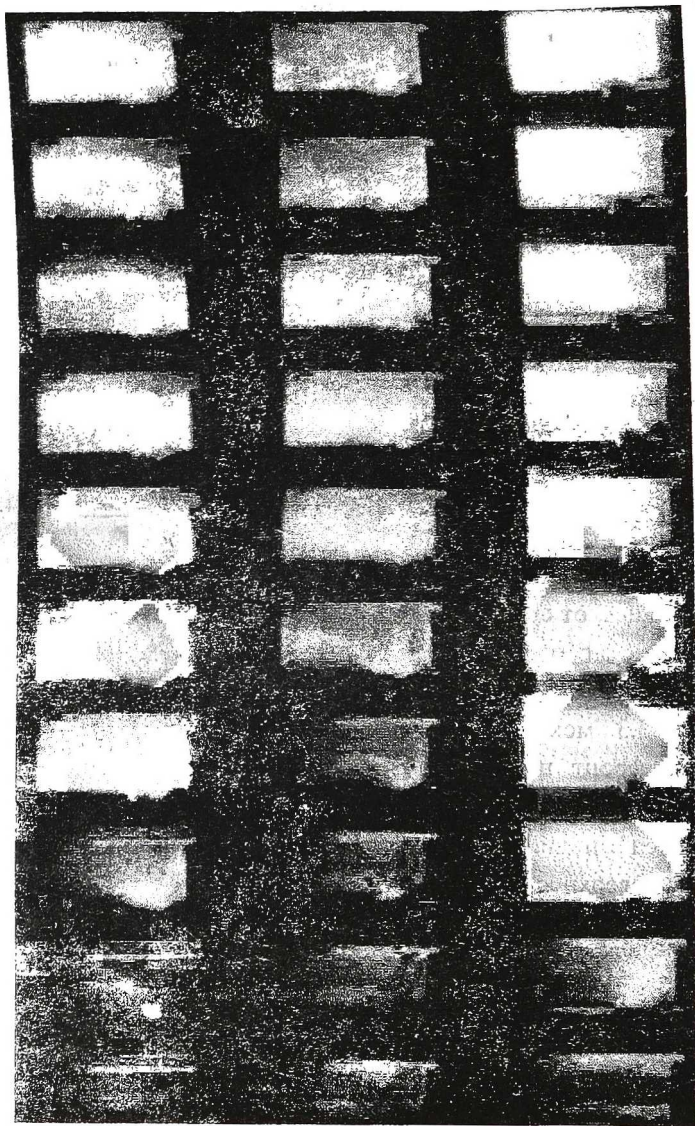


Рис. 5 Влияние начальной турбулентности потока АВС на процесс зажигания. Слева на право -  $\epsilon_0=5\%$ ;  $\epsilon_0=22\%$ ;  $\epsilon_0=12\%$ .

Если при трубной турбулентности, пламя, вначале распространившись практически по всей ЗР, поджигает основной поток АВС, то при повышенной турбулентности пламя, еще не успев, распространится по ЗР, вырывается в основной поток. На последующих кадрах уже видно, как пламя заполнило ЗР, распространилось в основной поток АВС и достигло среза канала. В данном случае, когда подача ПМГ в канал происходит непрерывно, и процесс развивается до самоподдерживающегося горения, в силу значительного теплового эффекта реакции горения большого количества АІ, прогрев вновь поступающих частиц определяется уже не только их теплообменом с окружающей средой, но и дополнительным теплоподводом (температуропроводностью и излучением) из зоны горения. В результате чего скорость прогрева частиц возрастает, а их  $\tau_{вп}$  уменьшается.

В работах [8,9] исследовался процесс зажигания турбулентных потоков азровзвесей АІ с помощью зон рециркуляции в условиях, соответствующих рабочему процессу в камерах сгорания ЭУ. В работе [8] рассмотрен способ зажигания турбулентного потока АВС ЗР, за перфорированной пластиной в модельной камере сгорания двигательной установки. С помощью спектрозональной киносъемки и оптико-электронной дешифровки кинограмм процессов воспламенения и горения ПМГ в турбулентном потоке установлено, что устойчивость пламени за перфорированными пластинами обеспечиваются за счет образования зон обратных токов, заполненных продуктами сгорания АВС с температурой 2200 – 2800 К. В [9] предлагается поток активного газа разделить на две неравные части. В первый поток подается все ПМГ, которое воспламеняется и частично сгорает, а затем смешивается с вторичным потоком и догорает. При уменьшении доли первичного потока до минимально необходимой, обеспечивается низкоскоростное течение металлогазовой смеси с естественной стабилизацией фронта пламени. Огневые стендовые испытания экспериментальной камеры сгорания подтвердили надежное воспламенение и устойчивое горение АВС в широком диапазоне изменения параметров: давления – 0,21...1,0 МПа., скорость вторичного потока – 50 – 500 м/сек., коэффициент избытка воздуха – 1...9.

Помимо физико-химических методов воздействующих, в основном на покрывающую оксидную пленку возможен способ интенсификации процессов воспламенения и горения за счет наложения внешнего элек-

трического поля (ВЭП). Исследованию возможности интенсификации процессов воспламенения и горения аэрозвеси частиц ПМГ на основе Al при наложении ВЭП посвящена работа [10]. На основании проведенных исследований было получено, что ВЭП интенсифицирует процесс воспламенения турбулентного потока аэрозвеси ПМГ ЗР за плохообтекаемым телом. Авторы отмечают, что положительный результат получен в условиях развитого турбулентного течения и может служить основой для разработки практических рекомендаций по интенсификации процессов воспламенения и горения в камерах сгорания ЭУ.

Анализ результатов исследований показал, что рост концентрации частиц снижает температуру самовоспламенения, а локальной неоднородностью газозвеси обусловлено воспламенение в первую очередь мелких частиц Al и сгорание последних при местном соотношении компонентов. Микрокапсулирование частиц фторсодержащими органическими соединениями позволяет уменьшить период индукции воспламенения газозвесей Al.

При организации процесса зажигания ПМГ на основе Al в камере сгорания ЭУ необходимо в зоне воспламенения иметь температуру не ниже  $T_{кр}$ . Значение которой, учитывая влияние концентрации на  $T_{кр}$  составляет 1040...1220 К. Зажигание высокоскоростного турбулентного потока ПМГ в камере сгорания ЭУ можно обеспечить с помощью аэродинамической рециркуляции, организовав тем или иным способом зону обратных токов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 240с.
2. Smolenki D., Sewerynian. Bull. Woiskowej akademii Techn. J. Dobrowskiego. –1963. – 12. - №37.
3. Афанасьев С.Н., Жарков В.Ю., Озеров Е.С. Воспламенение и горение газозвеси частиц алюминия// Физика аэродисперсных систем. – 1985. №27. – С. 39-42.
4. Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Мальцев В.М., Селезнев В.А. О возможности увеличения скорости распространения фронта пламени в аэрозвеси алюминия.// ФГВ. – 1992. – 28. №2. – С. 51-54.
5. Льюиз Б., Пиз Р., Тейлор Х. Процессы горения.- М.: ИЛ, 1961.- 542с.



6. Hartman I. Recent Rescart on the Explosibility of Dust Sisperions // Ind. and Eng. Chem. – 1948. – 40 №4. – p. 752-758.
7. Егоров А.Г. Стабилизация пламени псевдожидкого топлива в камере сгорания с внезапным расширением.: Дис. ... канд. техн. наук.- Казань, 1993. – 150с.
8. Ягодников Д.Я. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. - М.: - 1997. - С.32.
9. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин Н.С. Организация воспламенения и горения металлических порошков в потоке активных газов// Тезисы выступлений. Российская межвузовская и межотраслевая научно-техническая конференция "Ракетно-космические двигательные установки". М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – С.29.
10. Ягодников Д.А., Воронецкий А.В. Влияние внешнего электрического поля на горение взрывзвеси частиц алюминия// ФГВ. – 1998. - 34. №6. - С. 23-28.

УДК 62-762765; 621.4; 621.45.037; 629.7.05.

## СИЛЬФОННЫЙ МИКРОКОМПРЕССОР

Довгялло А.И., Докторов О.Ю.

*Самарский государственный аэрокосмический университет*

Существующие поршневые и мембранные микрокомпрессоры для дроссельных систем охлаждения (СО) с холодопроизводительностью до 10 Вт азотного уровня (80 К) имеют повышенное энергопотребление. Это объясняется тем, что для уровня малых мощностей в микроэнергетике, когда масштабный фактор в значительной степени влияет на совершенство рабочего процесса, существующие для этих машин проблемы герметизации, смазки, теплообмена вступают в противоречие с экономичностью и надежностью.

Частично или полностью эти проблемы могут быть решены в конструкциях машин, в которых рабочие цилиндры выполнены в виде складывающихся мембранных сильфонов. Обладая полной герметичностью, большой поверхностью теплообмена, не нуждающиеся в смазке силь-